УДК 621.313

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Р.Ф. Бекишев, С.И. Качин, Ю.С. Боровиков

Томский политехнический университет
E-mail: borovikov@tpu.ru

Статья носит обзорный характер и посвящена основным этапам развития коммутационной научной школы Томского политехнического университета за период с 1965 по 2003 годы. В работе рассмотрены вопросы выполнения контактных элементов электрических машин из углеродных материалов. Уделено немаловажное место исследованиям, направленным на расширение функциональных возможностей применяемых конструкций коллекторно-щеточных узлов и активных элементов коллекторных машин, а также работам, направленным на обеспечение инженерного корпуса методиками и программами для осуществления оптимального проектирования всего многообразия коллекторных электрических машин. Отмечены работы в области создания диагностических комплексов для оценки состояния устройств скользящего токосъема в различных режимах работы, а также создания специальных методик и расчетных программ для обработки получаемой информации.

Введение

Коллекторные электрические машины (КЭМ) находят все более широкое применение во всех отраслях промышленности, в системах средств связи и в бытовой технике. Обладая известными преимуществами перед электрическими машинами переменного тока, в частности, возможностью плавного и экономичного регулирования частоты вращения, универсальными рабочими характеристиками, коллекторные электродвигатели являются незаменимыми в системах электроприводов.

Широкое использование в машиностроении станков с числовым программным управлением требует разработки надежных электроприводов с широким регулированием частоты вращения и повышенными крутящими моментами. Для этих целей разработаны и совершенствуются новые модификации коллекторных высокомоментных электродвигателей.

Электродвигатели постоянного тока нашли широкое применение для привода бортовой авиационной и космической аппаратуры, а также в системах специальной техники.

Развитие полупроводниковой электроники и разрабатываемой на ее базе преобразовательной техники привело к созданию бесколлекторных

двигателей постоянного тока, представляющих собой сочетание электрической машины с полупроводниковым преобразователем. Однако многолетний опыт использования бесконтактных двигателей показал, что коллекторные электродвигатели по удельным электрическим нагрузкам, простоте и универсальности остаются до настоящего времени непревзойденными.

Бурное развитие индустрии быта потребовало разработки бытовой техники различного назначения. Подавляющее большинство бытовых приборов с вращающимися рабочими органами используют в качестве привода коллекторные электродвигатели выпрямленного или переменного тока. Поэтому выпуск коллекторных электродвигателей постоянного и переменного тока постоянно увеличивается, достигая в настоящее время нескольких млн. машин в год. Характерно, что промышленно-развитые страны увеличивают вдвое выпуск коллекторных машин каждые 5–7 лет.

С расширением областей применения коллекторных электродвигателей требования к ним постоянно возрастают. Это касается в первую очередь повышения удельных мощностей и расширения диапазона регулирования частоты вращения. Так в серии машин постоянного тока 2П, разработанной для тиристорного электропривода, увеличена в 3 раза удельная мощность и диапазон регулирования по сравнению с машинами серии П. Разработанная в 80-х годах унифицированная по конструкции и технологии изготовления с асинхронными двигателями единая серия машин постоянного тока 4П имеет удельные мощности и диапазон регулирования, превышающие в 3...4 раза данные параметры машин серии 2П. Это стало возможным за счет применения распределенных по пазам статора обмоток возбуждения и компенсационной, а также полностью шихтованного магнитопровода. Использование для производства машин постоянного тока технологического оборудования единой серии асинхронных двигателей обеспечило снижение себестоимости изготовления коллекторных машин.

Проектирование все более совершенных серий машин постоянного тока потребовало комплексных исследований тепловых, механических и коммутационных процессов, разработки новых конструкций и использования современных материалов.

Ученые и выпускники Томского политехнического института (ТПИ) внесли существенный вклад в создание совершенных коллекторных машин. Выпускник ТПИ, заслуженный деятель науки и техники М.Ф. Карасев, создавший сибирскую школу коммутации электрических машин, вместе с многочисленными учениками разработал теорию оптимальной коммутации электрических машин, методики расчета и приборы для исследования коммутационного процесса [1].

Установившаяся тенденция повышения удельных электромагнитных нагрузок, номинальных скоростей вращения, расширения диапазона регулирования в сочетании с возрастающей долговечностью электрических машин и требованием обеспечить электромагнитную совместимость с радиоэлектронной аппаратурой ставит разработчиков коллекторных машин в достаточно жесткие условия. Становится все труднее обеспечивать надежную работу коллекторных машин в экстремальных климатических режимах: в условиях вакуума, повышенной влажности, высокой и низкой температуры окружающей среды.

1. Совершенствование коллекторных машин применением для изготовления коллекторно-щеточных узлов неокисляющихся углеродных материалов

Дальнейшее совершенствование коллекторных машин стало возможным с применением новых неокисляющихся материалов для изготовления коллекторов.

Исследования КЭМ, проведенные в ТПИ в 70–80 годы, позволили обосновать целесообразность и технологическую возможность применения углеродных материалов для изготовления коллекторов и контактных колец [2]. Разработаны конструкции коллекторов из антифрикционного графита и углепластиков и методы расчета прочностных и электрических характеристик коллекторов. Детально исследованы физические свойства скользящего контакта щетка – углеродный коллектор и получена количественная оценка коммутирующих свойств контакта, учитывающая влияние различных факторов. Разработаны методики аналитического расчета коммутационной напряженности и коммутационной устойчивости коллекторных машин с углеродными коллекторами и установлены особенности их проектирования. Испытания опытных и промышленных партий более 20 типов электрических машин с углеродными коллекторами показали повышенные технические и эксплуатационные параметры разработанных машин. Коммутационная устойчивость машин с углеграфитовыми коллекторами в 1,5...2 раза, а с коллекторами из углепластиков в 2,5...4 раза выше, чем у подобных машин с медными коллекторами. Использование неокисляющихся углеродных материалов для коллекторов обеспечивает надежную работу коллекторных машин в условиях низких атмосферных давлений, в которых скользящий контакт с медным коллектором неработоспособен. Кроме того, контактная пара из углеродных материалов имеет на 1–2 порядка ниже уровень радиопомех на высоких частотах защищаемого диапазона от 0,15 до 30 МГц, что повышает электромагнитную совместимость коллекторных машин с радиоэлектронной аппаратурой.

2. Расширение функциональных возможностей активных элементов коллекторных машин

В силу сложности технологии производства якорей электрических машин с контактными элементами из углеродных материалов и резким снижением объема выпуска электродвигателей специального назначения, данный путь совершенствования КЭМ не получил своего широкого развития. В конце 90-х годов начало развиваться новое научное направление – создание КЭМ с нетрадиционной электромагнитной архитектурой их активной зоны.

Сущность нетрадиционности заключается в применении так называемых демпфированных обмоток на якоре, обладающих повышенной коммутирующей способностью, а также индукторов с анизотропией магнитных свойств [3–6]. Существенной особенностью демпфированных обмоток якоря является наличие высокой электромагнитной связи у всех коммутируемых секций с последующими (в порядке коммутации) секциями. В простейшем случае обмотка данного типа состоит из секций, разделенных на две катушки с одинаковым шагом по якорю и смещённых относительно друг друга на одно зубцовое деление (рис. 1).

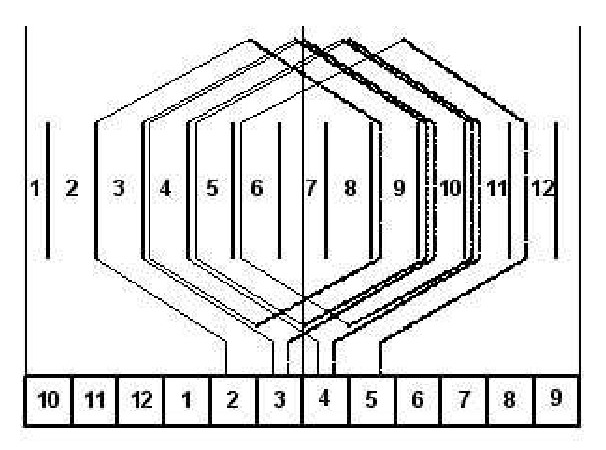


Рис. 1. *Вариант исполнения демпфированной обмотки якоря*

При этом все секции якоря имеют повышенную электромагнитную связь с соседними секциями, которая, к тому же, может быть практически одинаковой у всех секций якоря. Одновременно в данной обмотке достигается снижение величины индуктивности секций вследствие ее разбиения на две катушки и их размещения в разных пазах якоря.

Высокая коммутирующая способность демпфированных обмоток выражается в существенном снижении энергии, выделяющейся в электрических дуговых разрядах под щётками в конце периода коммутации секций якоря.

Поскольку электромагнитная энергия, запасённая в секции, определяется величиной индуктивности и током секции, то любое уменьшение данных параметров в момент разрыва коммутируемого контура обеспечивает снижение энергии коммутационного искрения. Поэтому естественно, что уменьшение величины индуктивности секций в демпфированных обмотках якоря непосредственно сказывается на снижении энергии искрения под щётками.

Одновременно при этом создаются и лучшие условия для протекания процесса коммутации, что позволяет уменьшать так называемый ток разрыва, который существует в секции якоря в момент завершения её коммутации сопротивлением щёточного контакта и который также определяет энергию коммутационного искрения.

Кроме того, часть электромагнитной энергии секции в конце периода коммутации, при наличии соответствующих условий, может быть передана в соседние коммутируемые контуры, что также уменьшает величину энергии секции, реализуемую в скользящем контакте в виде искрения.

Демпфированные обмотки якоря могут иметь по несколько сотен вариантов их выполнения, что обусловлено возможными различными соотношениями таких параметров, как число катушек в секциях, их взаимное пространственное расположение в пазах якоря, а также распределение витков секций по составляющим их катушкам.

Благодаря применению демпфированных обмоток якоря обеспечивается снижение суммарной энергии искрения секций паза якоря в реверсивном режиме в 14...17 раз и максимальной энергии искрения секций в 20...30 раз. В нереверсивном режиме работы электрической машины указанные выше параметры уменьшаются в 6...11 раз относительно базового уровня. При этом возможно уменьшение сдвига щеток с нейтрали с одновременным снижением энергий искрения и увеличением результирующего магнитного потока, что может быть использовано для повышения ряда основных эксплуатационных показателей данного класса электрических машин.

Таким образом, разработанные конструкции обмоток якорей коллекторных машин обладают рядом несомненных преимуществ перед традиционно применяемыми типами обмоток. Конструкции таких обмоток обеспечивают более сложное и органичное электромагнитное взаимодействие активных элементов машины, что позволяет выйти на более высокий уровень развития КЭМ.

Следующим из направлений улучшения технических характеристик КЭМ является снижение размагничивающего действия поперечной реакции якоря применением анизотропных конструкций индукторов. Поперечная реакция якоря приводит к размагничиванию (снижению) интегральной величины магнитного потока основных полюсов. К тому же в коллекторных машинах переменного тока наличие поперечного магнитного потока приводит к возрастанию величины индуктивности обмотки якоря, что сопровождается увеличением индуктивного сопротивления цепи якоря и снижением ЭДС вращения при заданном напряжении и

нагрузке (токе якоря). Оба указанных выше фактора обусловливают снижение электромагнитной мощности электрической машины и, соответственно, ее выходной мощности.

В целях снижения поперечного магнитного потока коллекторной электрической машины предлагается снизить магнитную проводимость ее магнитопровода в поперечном направлении.

Для этого в средних частях основных полюсов индуктора могут быть выполнены воздушные зазоры (рис. 2) [5], либо снижено сечение магнитопровода (рис. 3).

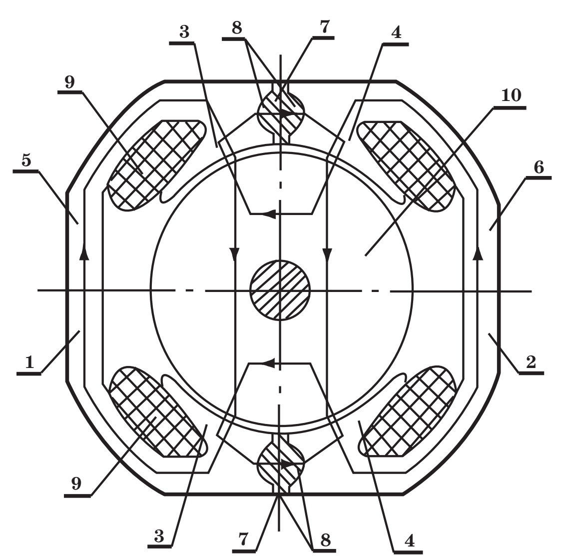


Рис. 2. *Конструкция индуктора с воздушными зазорами: 1, 2) магнитопровод, выполненный из двух разрывных частей зафиксированных друг относительно друга промежуточным немагнитным элементом – 8; 3, 4) наконечники основных полюсов; 5, 6) ярма индуктора; 7) воздушный зазор; 9) обмотка возбуждения; 10) якорь*

Наиболее приемлемым с технологической точки зрения решением по снижению поперечного магнитного потока является конструкция индуктора на (рис. 3) [6]. Данная конструкция не требует существенного изменения технологии изготовления индуктора и каких-либо дополнительных конструктивных элементов. Минимальная высота сечения полюса может быть выполнена на уровне 0,4...0,5 мм при скругленном пазе (магнитопроводе) в средней части полюса, либо на уровне 0,4...0,75 мм при прямоугольном пазе (магнитопроводе) в средней части полюса при толщине листа электротехнической стали 0,5 мм, что обеспечивает достаточное снижение поперечного магнитного потока.

Сущность предложенной конструкции на рис. 3 состоит в создании сужений нормальных продольных сечений в средних частях основных полюсов индуктора такой величины, которая при данных геометрических размерах индуктора обеспечивает уменьшение поперечного магнитного потока, эквивалентное его снижению при увеличении результирующего воздушного зазора для поперечного магнитного потока ориентировочно в 1,5 раза и более (за счет дополнительного зазора в средней части основных полюсов).

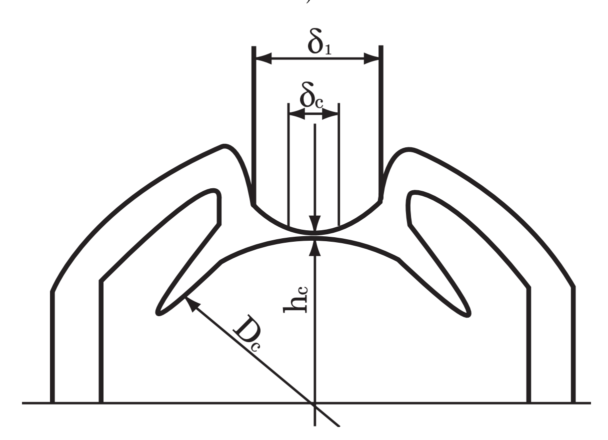


Рис. 3. *Конструкция индуктора с уменьшенным сечением магнитопровода в средних частях полюсов: δ_c – длина сужения; δ_1 – средняя длина воздушного зазора в средней части полюса; D_c – диаметр окружности, вписанной в расточку индуктора; h_c – геометрическая высота полюса в средней его части*

Экспериментальные исследования показали, что именно при таком уменьшении поперечного магнитного потока становится заметен эффект от его снижения, сказывающийся в улучшении коммутации секций якоря и в увеличении основного магнитного потока полюсов и электромагнитного момента электрической машины.

Разработанные конструктивные решения дают дополнительные возможности по улучшению ряда основных эксплуатационных показателей электрических машин малой мощности и, несомненно, обладают рядом преимуществ перед традиционно применяемыми типами индукторов.

Одним из направлений совершенствования коллекторных электрических машин при использовании разработанного технического решения является повышение их выходной мощности на 10...20 % при сохранении тепловой загрузки на заданном уровне, что подтверждается экспериментальными данными.

Другим направлением является минимизация расхода обмоточного провода на якоре или индукторе в коллекторных электрических машинах на 15...20 % при сохранении рабочих характеристик на требуемом уровне.

Следующим направлением является повышение ресурсных характеристик коллекторно-щеточных узлов электрических машин благодаря снижению электроэрозионной составляющей изнашивания контактных элементов. При этом интенсивность изнашивания щеток может быть уменьшена более чем в 2 раза.

3. Методики и программы для оптимального проектирования коллекторных электрических машин

В настоящее время наш научный коллектив помимо работ в направлении расширения функциональных возможностей применяемых конструкций коллекторно-щеточных узлов и активных элементов электрических машин немаловажное место уделяет обеспечению инженерного корпуса методиками и программами для осуществления оптимального проектирования всего многообразия коллекторных машин. Так, авторами разработана универсальная расчетная модель коллекторной электрической машины с произвольной конструкцией обмотки якоря, которая учитывает влияние поля основных полюсов на коммутацию, возможную анизотропию магнитных свойств индуктора, а также механическую и электрическую нестабильность скользящего контакта. На основе данной модели создан программный продукт для исследования коммутационных процессов коллекторных машин [7].

К числу основных блоков программы относятся блоки расчета: магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины с учетом насыщения магнитной цепи и возможного наличия анизотропии ее магнитных свойств; сопротивлений скользящего контакта с учетом механического состояния коллекторно-щеточного узла; мгновенных значений ЭДС вращения коммутируемых секций; процесса собственно коммутации секций якоря; коммутации на этапе возникновения искровых разрядов под сбегающим краем щетки; коммутационной устойчивости в машинах с дополнительными полюсами и без дополнительных полюсов; электромагнитной мощности, развиваемой коммутируемыми секциями; механической характеристики электродвигателя.

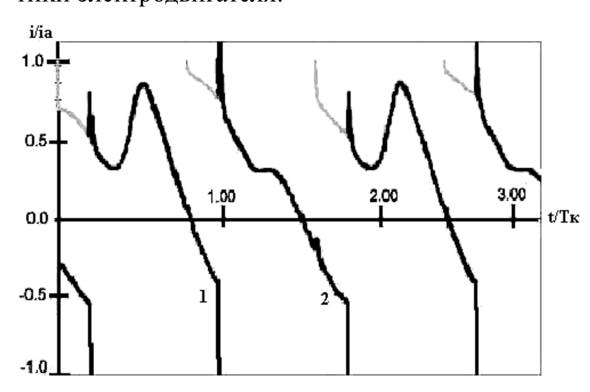


Рис. 4. Кривые токов в коммутируемых секциях якоря

Из всего объема получаемой в результате расчетов информации наибольший интерес для анализа представляют кривые токов в коммутируемых секциях якоря (рис. 4), характер изменения контактных сопротивлений в отдельных секциях, величины и поведение коммутирующих ЭДС секций в процессе коммутации, распределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины вдоль расточки индуктора (рис. 5), данные завершающего этапа процесса коммутации, такие, как ток разрыва, энергия искрового разряда, коэффициент демпфирования для конкретной секции якоря.

Разработанный программный продукт позволяет осуществлять расчет коммутации и ряда других рабочих параметров машин для широкой гаммы их конструктивного выполнения. Область применения программы охватывает машины с независимым и последовательным возбуждением, с дополнительными полюсами и без дополнительных полюсов, с традиционным однокатушечным выполнением секций обмотки якоря и с распределенными произвольным образом катушками секций демпфированных обмоток якоря, с традиционной изотропной конструкцией магнитопровода индуктора и с анизотропным магнитопроводом индуктора.

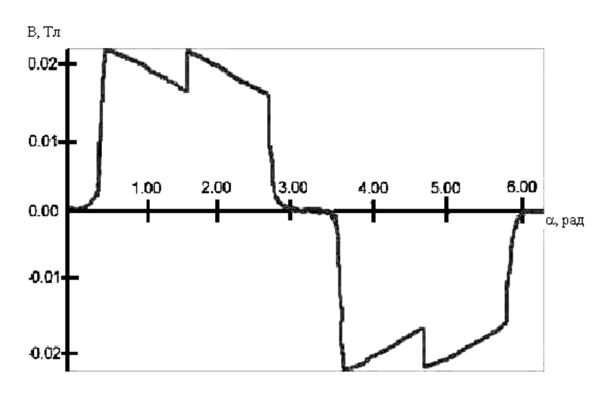


Рис. 5. Распределение магнитного поля в воздушном зазоре машины с анизотропным индуктором

Наряду с наличием удобного и достаточно простого интерфейса программы это обусловливает повышенный практический интерес к созданному программному обеспечению со стороны разработчиков электрических машин малой мощности.

4. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема электрических машин

Не менее перспективными являются традиционно проводимые в Томском политехническом университете работы по исследованию механического состояния коллекторно-щеточных узлов высокоскоростных электрических машин, в которых элементы узла токосъема функционируют в условиях повышенных механических нагрузок и вибраций. Необходимость контроля состояния профиля коллекторов и его стабильности в широком диапазоне частот вращения и тепловых нагрузок, а также параметров вибраций щеток потребовала создания специальных измерительных приборов дистанционного измерения перемещений контролируемых объектов с микронной точностью. Для решения задач экспериментальных профилометрических исследований коллекторно-щеточных узлов электрических машин разработана диагностическая систе-

ма [8], общий вид и функциональная схема которой представлены на рис. 6, 7.

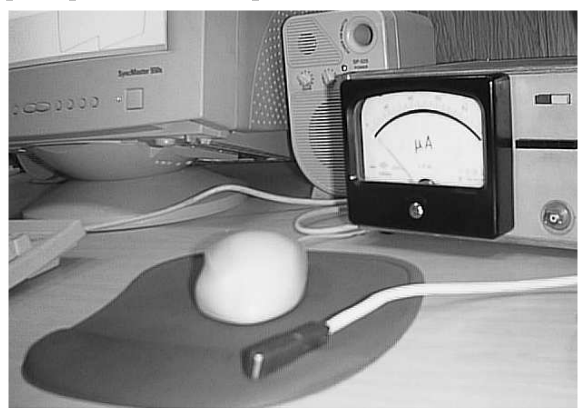


Рис. 6. *Общий вид диагностической системы*

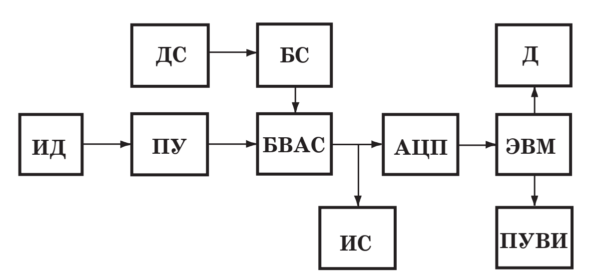


Рис. 7. *Функциональная схема диагностической системы: ИД – измерительный датчик; ПУ – промежуточный усилитель; БВАС – блок выделения аналогового сигнала; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЭВМ – электронно-вычислительная машина; Д – дисплей; ПУВИ – периферийное устройство выдачи информации; ИС – индикатор стрелочный; ДС – датчик синхронизации; БС -– блок синхронизации*

В качестве измерительного датчика (ИД) в разработанной системе (рис. 7) используется датчик токовихревого типа, который находит наиболее широкое применение благодаря его высокой чувствительности, надежности, высокой помехоустойчивости к внешним магнитным и электрическим полям, независимости показаний от состояния политуры на коллекторе и изменения свойств окружающей среды.

Функциональная схема аналоговой части прибора и ее выходной сигнал в процессе измерения профиля коллектора приведены на рис. 8, 9.

Разработанные схемные решения, а также специальные компьютерные программы позволили достичь высокой точности измерений профиля (до 0,5 мкм) коллекторов.

Предложенный в последнее время метод базовой коррекции в процессе измерений позволил повысить точность измерений и открыл возможность получения дополнительной информации о температуре коллектора, что расширяет функциональные возможности прибора и требует создания специальных вычислительных программ и целенаправленного проектирования элементов измерительной системы для достижения максимальных технических характеристик [3].

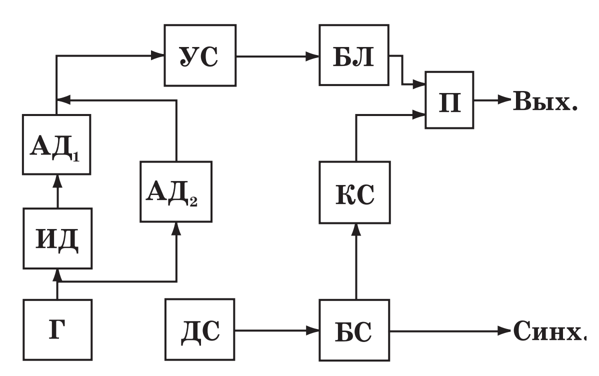


Рис. 8. *Функциональная схема аналоговой части прибора: Г – генератор высокочастотных сигналов; ИД – измерительный датчик; АД₁, АД₂ – амплитудные детекторы; УС – усилитель сигнала; БЛ – блок линеаризации; ДС – датчик синхронизации; БС – блок синхронизации; КС – калибратор сигнала; П – переключатель рода работы*

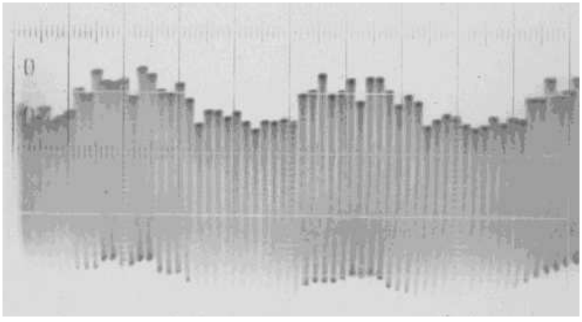


Рис. 9. *Выходной сигнал аналоговой части прибора в процессе измерения профиля коллектора*

Таким образом, применение диагностических систем для контроля профиля коллекторов позволяет объективно оценивать рабочую поверхность коллекторов в динамических режимах их работы, без чего практически невозможна целенаправленная отработка конструкций и технологии изготовления коллекторов, а также контроль поведения коллекторно-щеточных узлов на всех стадиях выпуска электрических машин и в период их эксплуатации у потребителя. Это позволяет вносить коррективы в технологический процесс, прогнозировать отказы коллекторно-щеточных узлов и выявлять причины неисправностей.

Выводы

В соответствии с вышесказанным можно выделить следующие пути совершенствования КЭМ:

1. Использование в производстве контактных элементов электрических машин углеродных волокнистых материалов, что обеспечивает более оптимальное протекание коммутационных процессов в КЭМ.

2. Разработка принципиально новых конструкций активных элементов (конструкции демпфированных обмоток якоря и анизотропных индукторов), удовлетворяющих критериям оптимальности и обеспечивающих значительное повышение эксп-

луатационных показателей электрических машин.

3. Создание методик и программ для оптимального проектирования коллекторных электрических машин.

4. Разработка и внедрение диагностических комплексов нового поколения для оценки и прогнозирования качества функционирования устройств скользящего токосъема в статических и динамических режимах работы (на основе сочетания аналоговой и цифровой электронной техники), а также создания специальных методик и расчетных программ для обработки получаемой информации с целью достижения максимальной точности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев М.Ф. Оптимальная коммутация машин постоянного тока. — М.: Изд-во "Транспорт", 1967. — 180 с.
2. Бекишев Р.Ф. Электрические машины малой мощности с углеродными коллекторами. Автореферат дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МЭИ, 1987. — 42 с.
3. Качин С.И. Высокоиспользованные коллекторные электрические машины малой мощности. Автореферат дисс... докт. техн. наук. — Томск: ТПУ, 2002. — 43 с.
4. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности // Электричество. — 1997. — № 6.
5. Пат. 2104605 РФ. Статор коллекторной электрической машины / С.И. Качин. — Опуб. в Б.И. № 4, 1998.
6. Пат. 2107375 РФ. Статор коллекторной электрической машины / С.И. Качин. — Опуб. в Б.И. № 8, 1998.
7. Универсальная компьютерная программа для расчета коммутации коллекторных электрических машин малой мощности / Р.Ф. Бекишев, Ю.С. Боровиков, С.И. Качин; Том. политехн. ун-т. — Томск, 2001. — 27 с.: ил. — Библиогр.: 6 назв. — Рус. — Деп. в ВИНИТИ 10.01.02 № 38-В2002.
8. Borovikov Yu.S. Diagnostic system for the estimation of the collector and brush units mechanical state under static and dynamic operating conditions // Modern Technique and Technologies. The VIII International Scientific and Practical Conference of Students, Post graduates and Young Scientists. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2002. — P. 212.

УДК 531.383